

# Phasen-Sensitiver Detektor (PSD)

Verwende Referenzsignal mit der Frequenz  $f_2$  und messe Antwortsignal des Systems mit der gleichen Frequenz  $f_1=f_2=f$

Benutze Mixer plus **Low-Passfilter**, um Summenfrequenz wegzufiltern.

$$u_3 = \frac{U_1 U_2}{2} \cos[(\Phi_1 - \Phi_2)]$$

~~$$-\frac{U_1 U_2}{2} \cos[2\pi(2f)t + (\Phi_1 + \Phi_2)]$$~~

$$\Rightarrow u_3 = \frac{U_1 U_2}{2} \cos[(\Phi_1 - \Phi_2)] \propto U_1 \cos(\Phi)$$

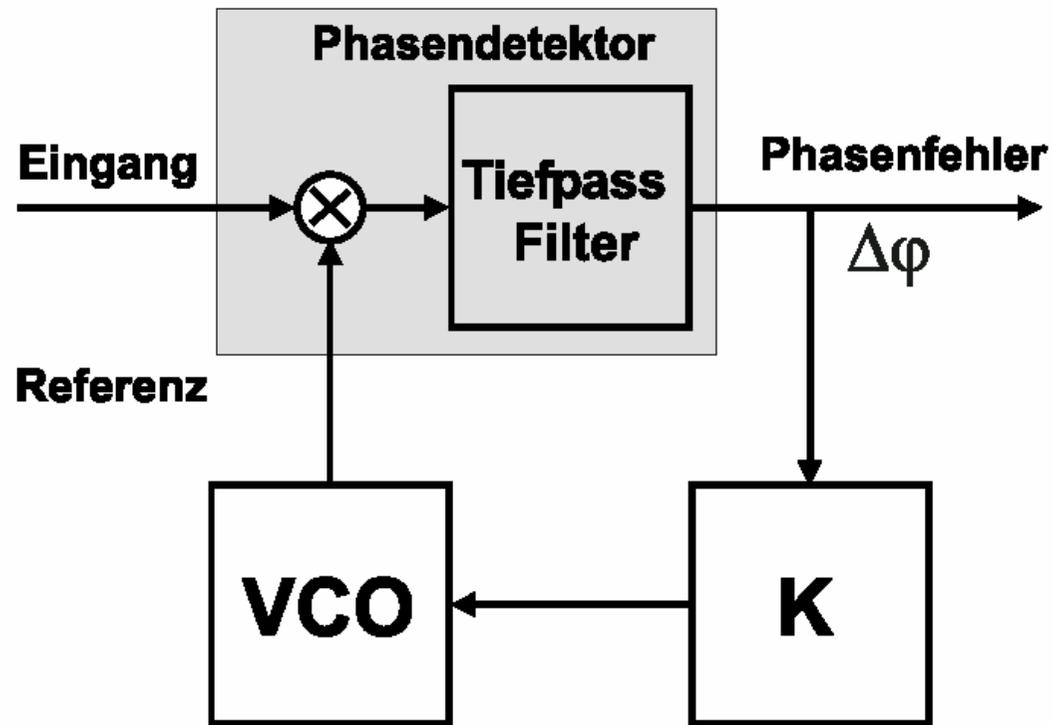
Es lässt sich Amplitude bzw. Phasenverschiebung messen

# Phase-Locked Loop Technique (PLL)

Die Synchronisation des Referenzoszillators mit dem Eingangssignal wird beim PLL mittels einer Rückkopplung realisiert. Am Eingang des PLL vergleicht ein Phasendetektor das Eingangssignal  $u_E(t) = U_E \sin(\omega_E t + \varphi_E)$  mit dem Referenzsignal  $u_R(t) = U_R \sin(\omega_R t + \varphi_R)$  eines VCO (voltage controlled oscillator). In einem eingerasteten PLL sind die zwei Frequenzen  $\omega_E$  und  $\omega_R$  gleich gross. Daher misst ein Multiplikator mit nachfolgendem Tiefpass-Filter die Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  zwischen den Signalen  $u_E(t)$  und  $u_R(t)$ .

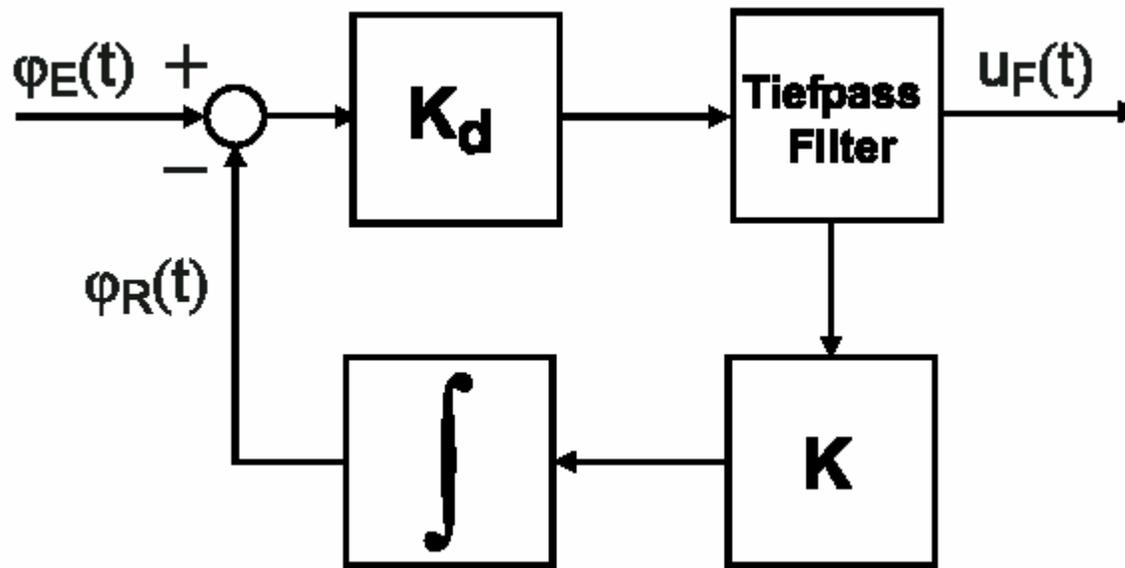
$$u_E \cdot u_R = \frac{U_E U_R}{2} \cos[(\Phi_E - \Phi_R)] \propto U_1 \cos(\Phi) = K \sin(90^\circ + \Delta\varphi)$$
$$\approx K_d \cdot \Delta\varphi$$

# Phase-locked loop technique

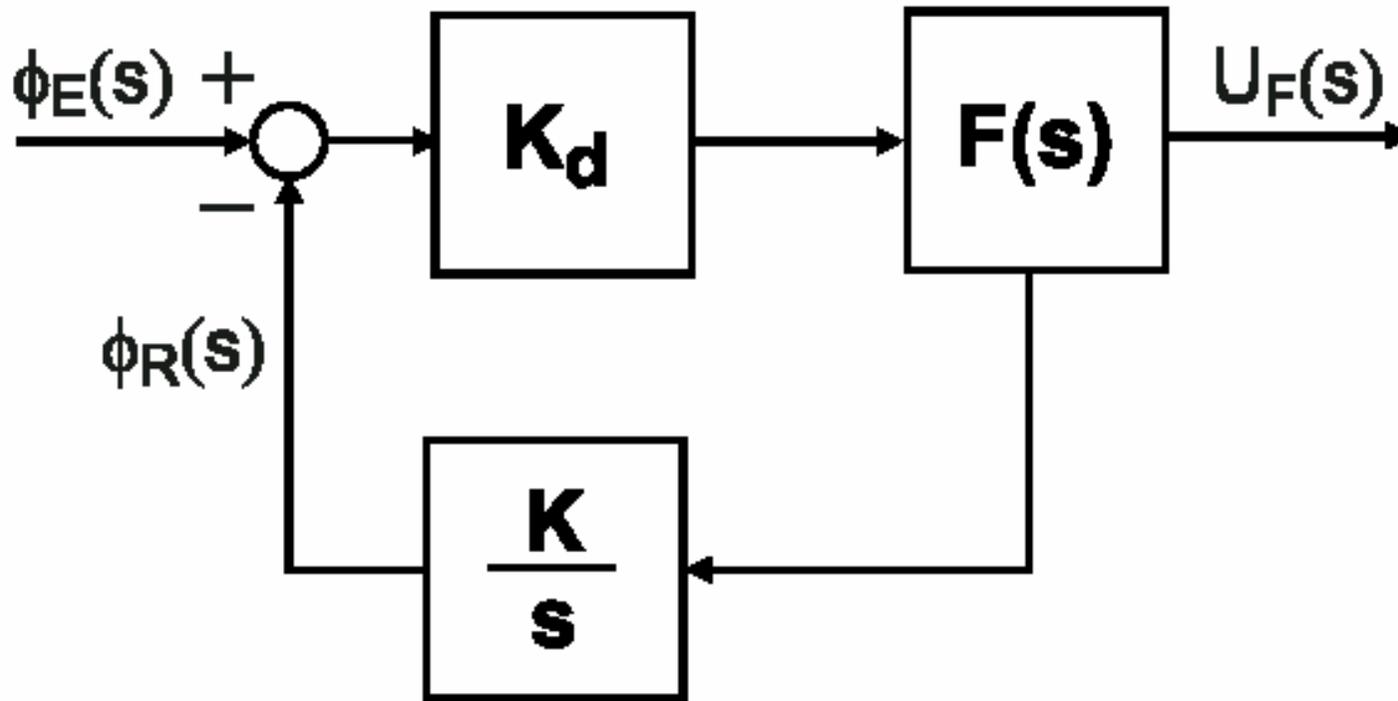


Das Referenzsignal wird mit einem VCO (voltage controlled oscillator) erzeugt. Ein Regelkreis mit dem Gain  $K$  regelt den Phasenfehler  $\Delta\phi$  zu null.

# Block-Diagramm für die Phasenübertragung

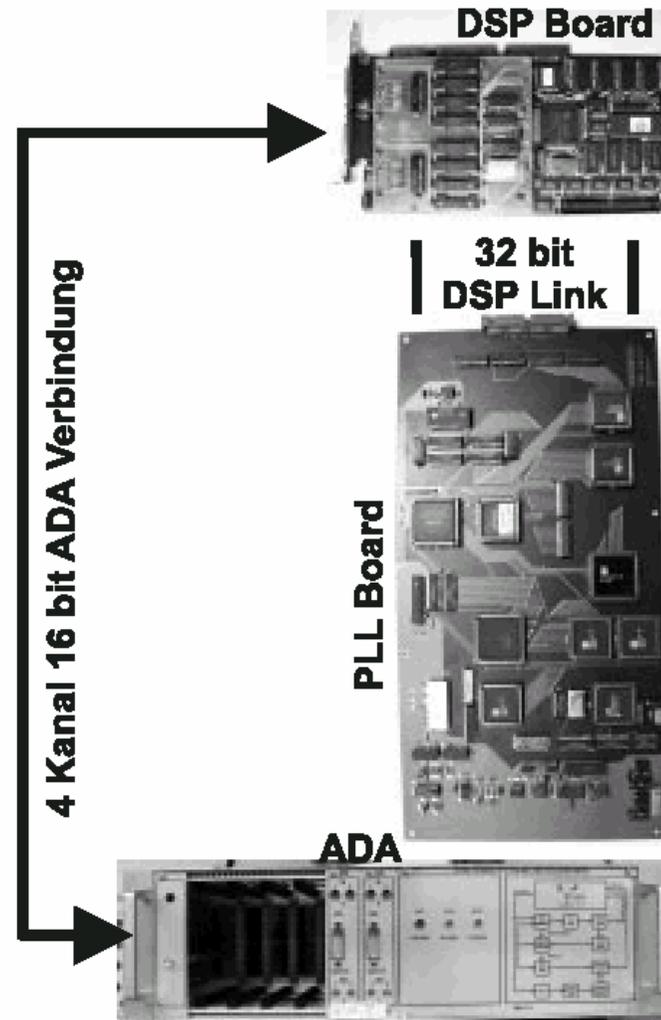


# Phasenübertragung im Frequenzbereich

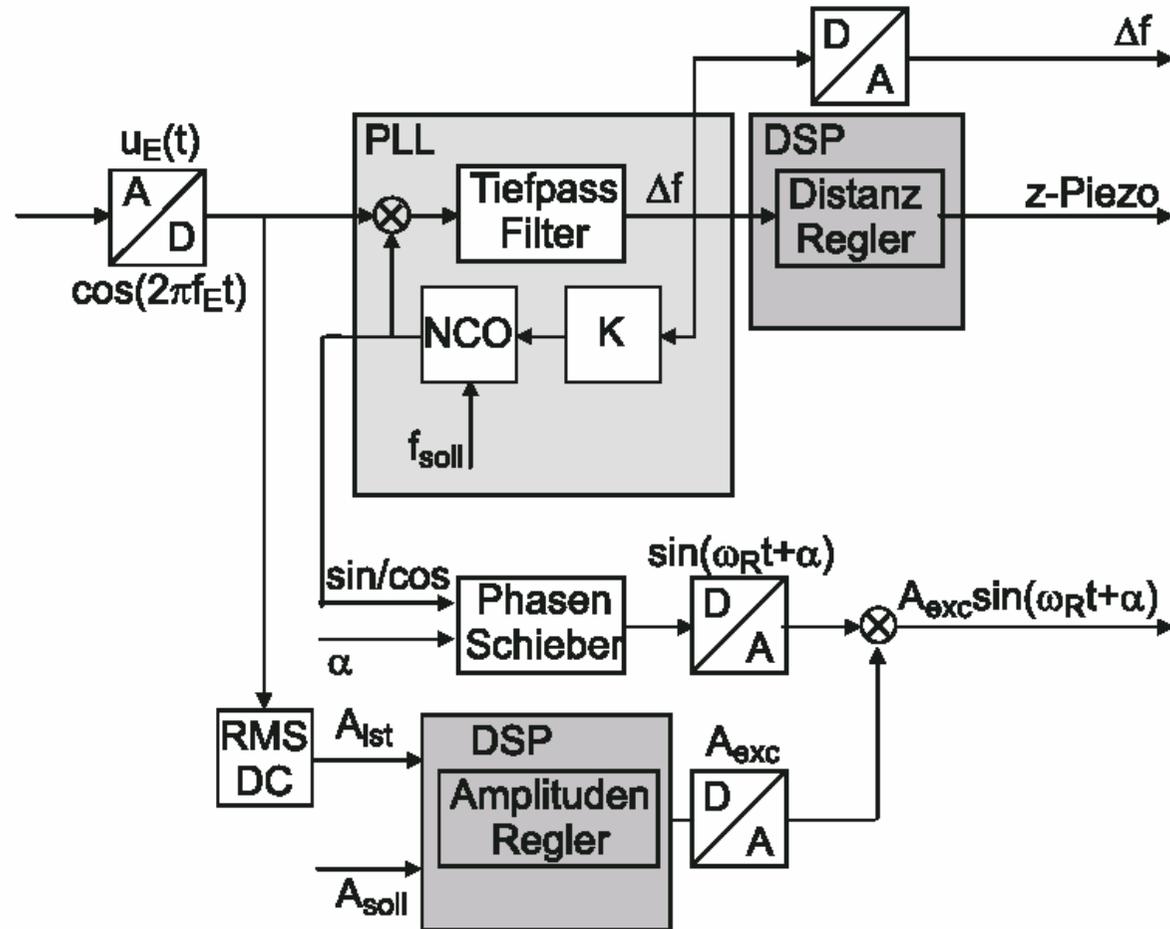


# Realisierung eines digitalen PLLs

Frequenzauflösung von mHz  
mit 100kHz Signalen  
Dynamik:  $10^8$  !

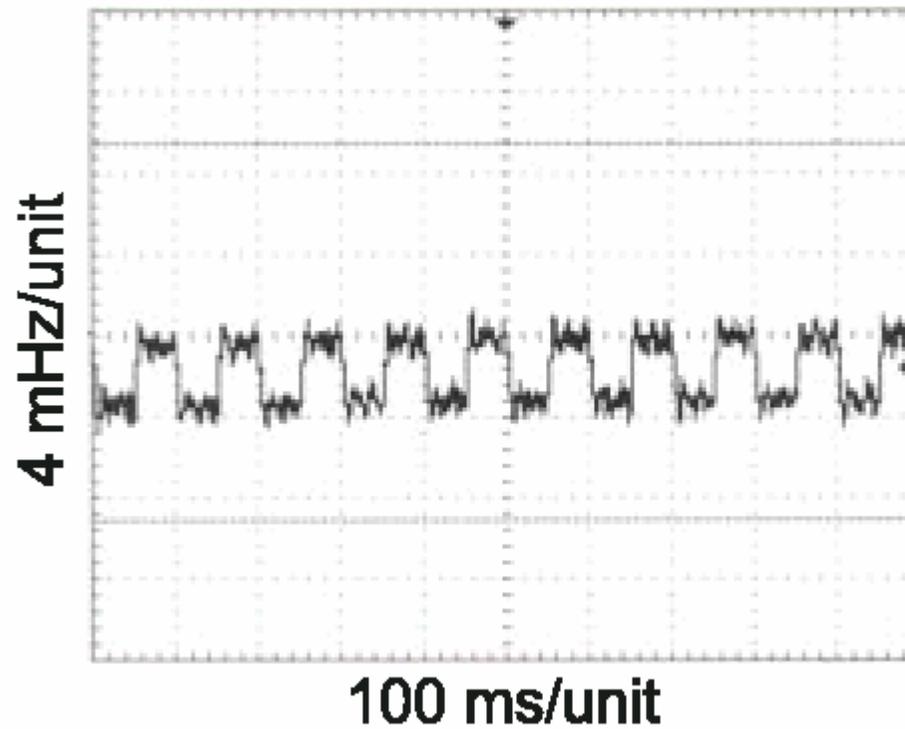


# Digitaler PLL



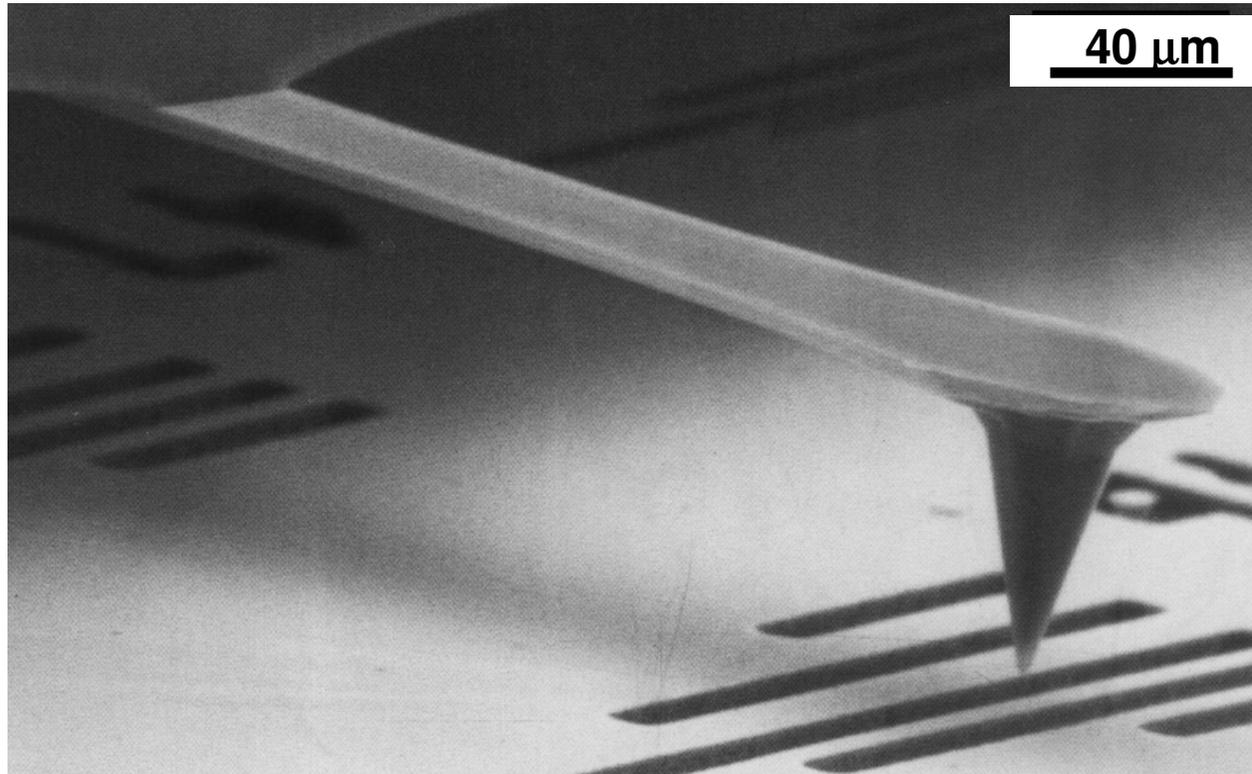
NCO: Numerical controlled oscillator

# Frequenzauflösung



mHz-Frequenzauflösung mit 150kHz Signalen!

# Wozu PLL?

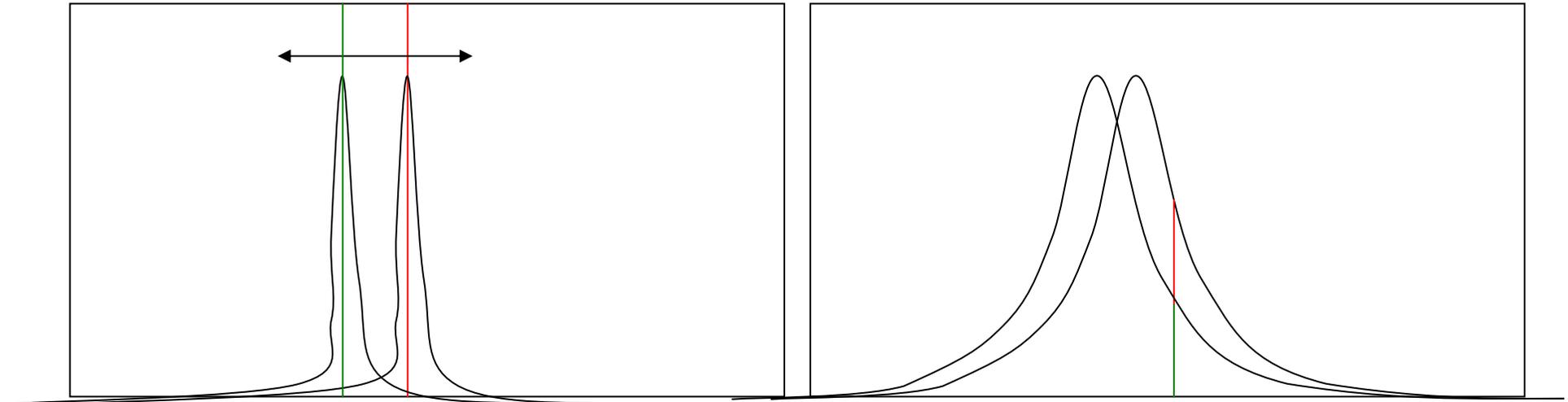


Hoher Q-Faktor von 10'000 bis 1'000'000 bedingt, dass Resonanzkurve extrem schmal  
 $Q=f / \Delta f$  . Mit  $f=100\text{kHz}$  ergibt sich  $\Delta f =1\text{Hz}$ . Mit fester Referenzfrequenz ist es praktisch unmöglich zu arbeiten. Temperaturdrift der Frequenz, Frequenzverschiebung durch Wechselwirkung

# Fazit:

PLL: Variable Frequenz, fixe Amplitude

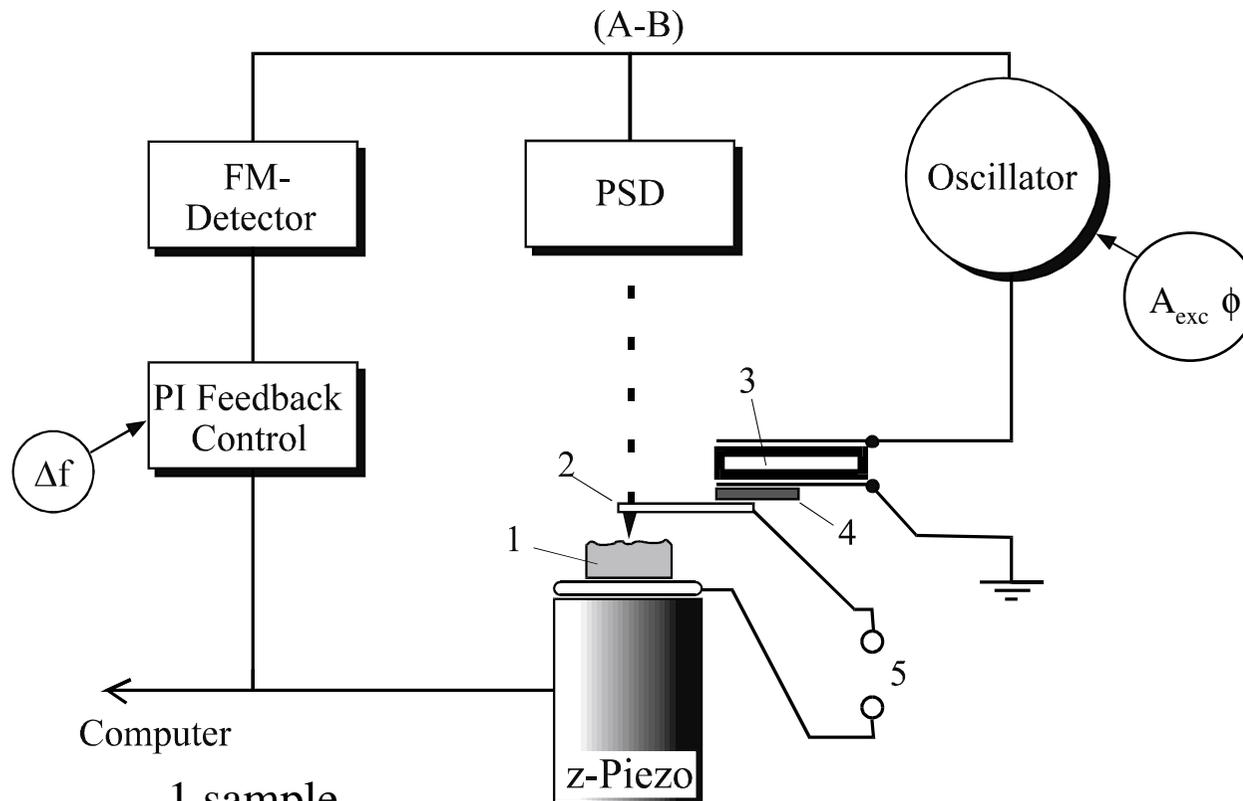
Lock-In: Fixe Frequenz, variable Amplitude



Systeme mit hohen Güten und schmalen Resonanzkurven lassen sich nur mit PLL (d.h. Variabler Frequenz) behandeln.

Mit einer breiten Resonanzkurve kann auch mit Lock-In gearbeitet werden.

# Prinzip des non-contact AFM's

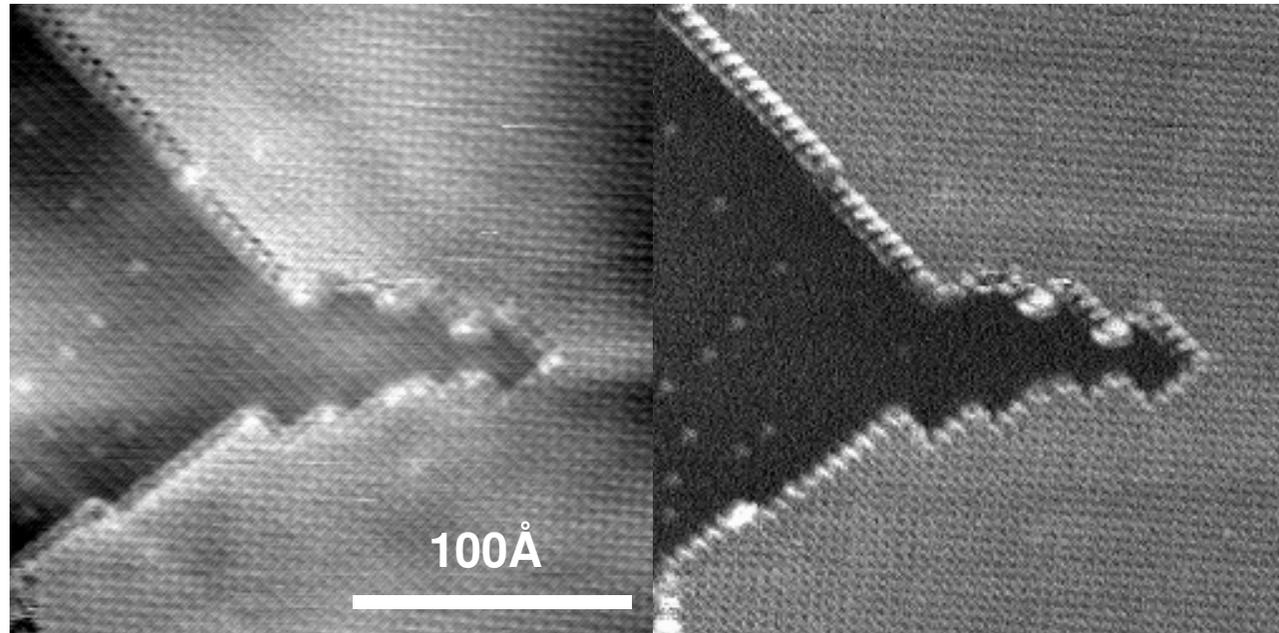


Oscillator:  
 $f_0 = 150 \text{ kHz}$ ,  
 $Q = 10'000$

PSD:  
 Photo Sensitive  
 Detector  
 $B \approx 700 \text{ kHz}$

FM-Detector:  
 $B < 1 \text{ kHz}$

# Beispiel einer dynamischen Kraftmikroskopiemessung



Topography

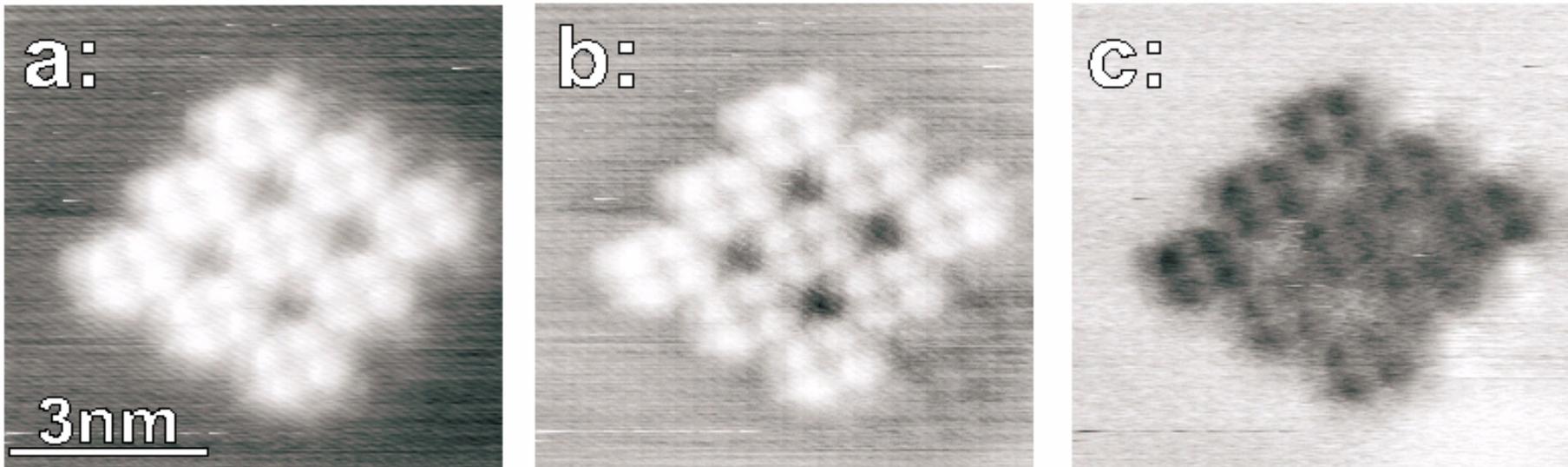
Excitation Amplitude ( $A_{\text{exc}}$ )

$k=26\text{N/m}$   $f_0=158.3\text{kHz}$   $A=0.7\text{nm}$   $\Delta f=-185\text{Hz}$   $(\Delta f/f)kA = -0.02\text{nN}$

⇒ Step atoms and kink sites give different contrast

R. Bennewitz et al. Phys. Rev. B, 62:2074, 2000

# Dynamische Kraftmikroskopie auf Molekülen



Cu-tetra (3,5 di-*t*-butylphenyl) porphyrin (Cu-TBPP)

Ch. Loppacher et al., Physical Review Letters Vol. 90, No. 6, 066107 (2003)